

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:
DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENAS LOG-PERIÓDICAS PARA LA
BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA**

**AUTORES:
LEONARDO PAUL IZA CUZCO
EDGAR ROBERTO LLANO CATOTA**

**TUTOR:
LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN**

Quito, noviembre del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Leonardo Paul Iza Cuzco con documento de identificación N° 1724328610 y Edgar Roberto Llano Catota con documento de identificación N° 1723167795, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico intitulado: **DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENAS LOG-PERIÓDICAS PARA LA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Electrónicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, noviembre del 2021

Atentamente,

Leonardo Paul Iza Cuzco
C.C: 1724328610

Edgar Roberto Llano Catota
C.C: 1723167795

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENAS LOG-PERIÓDICAS PARA LA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA, realizado por Leonardo Paul Iza Cuzco y por Edgar Roberto Llano Catota, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, noviembre del 2021

Atentamente,



Ing. Lenin Wladimir Aucatoma Guamán, MSc
C.C: 1717985830

DEDICATORIA

Lo dedico especialmente a Dios, por ser quien ha guiado mi camino, por darme la sabiduría y las fuerzas para dar pasos firmes, pero sobre todo ser constante y perseverante, a fin de no dejarme vencer a pesar de todas las adversidades presentes a lo largo de mi carrera.

A mis padres Alicia Cuzco y Luis Iza quienes han sido un pilar fundamental en mi vida y han estado conmigo constantemente, puesto que, con su amor, sabiduría y su apoyo incondicional me forjaron para ser una excelente persona y un hijo de bien, a no darme por vencido para alcanzar cada una de mis metas y objetivos. Sin duda son y serán mi fuente de inspiración para seguir adelante y conseguir muchos más éxitos, sepan que los amo mucho.

A mi hermano Alexander Iza, quien desde muy pequeño siempre ha confiado en mí, siendo como un segundo padre, brindándome su apoyo incondicional, dándome palabras de aliento para esforzarme cada día más, con el fin de conseguir cada uno de mis ideales.

A mis amigos quienes de una u otra manera han estado conmigo, con sus consejos, risas y sobre todo compartir momentos inolvidables a lo largo de esta etapa universitaria.

A toda mi familia en general, quienes depositaron su confianza en mí, poniendo su granito de arena, y demostrando un afecto inmenso.

Leonardo Paul Iza Cuzco

DEDICATORIA

Dedico este artículo principalmente a Dios me ha permitido llegar hasta este punto, por cada maravilloso día y lograr culminar esta etapa de mi vida.

Con todo mi corazón le dedico a mi madre María Catota al apoyarme en todo momento al estar pendiente de mi formación tanto personal como académica, por tu cariño y tu amor incondicional que siempre me has dado.

A mi padre Jorge Llano por todas las enseñanzas que me has dado, motivándome siempre a seguir adelante, permitiéndome así llegar a la meta, demostrándome tu amor incondicional y estar siempre atento en mi futuro.

A mis hermanos Geovani y Edison que siempre han estado junto a mí, me han enseñado a ser una mejor persona, estoy y estaré eternamente agradecido ñaños son mi inspiración para ser mejor cada día, los quiero mucho y gracias por brindarme todo su apoyo.

A mis cuñadas Graciela y Fanny por sus palabras de aliento y sus buenos deseos, que me han ayudado a afrontar los retos que se ha presentado a lo largo de mi vida.

A mis pequeños sobrinitos Ana Paula, Andrés, Maribel y Galo que llenan mi vida de alegrías, los quiero mucho de todo corazón, de esta manera poder brindarles un buen ejemplo para seguir sus sueños y apoyar en sus vidas.

Con mucho cariño a toda mi familia en general, me han brindado su ayuda incondicional durante todo este arduo camino.

Edgar Roberto Llano Catota

AGRADECIMIENTO

A Dios se lo agradezco infinitamente, por darme la salud y la felicidad de tener una maravillosa familia, por darme la fortaleza y sabiduría de alcanzar este logro.

A mis padres quienes han estado conmigo en los momentos más importantes de mi vida, me veo reflejado en ellos como ejemplo de sacrificio y superación, enseñándome el camino de la vida y valorar todo lo que tengo a mi alrededor. Agradezco de todo corazón por todo el esfuerzo realizado, ya que han fomentado en mí el deseo de superarme y triunfar en la vida.

A mi hermano por ser como mi mejor amigo, con quien compartí los mejores momentos de mi vida, ha estado en las situaciones más adversas, con la finalidad de impulsarme siempre y ser un gran soporte para mí, gracias por ser indispensable.

De manera especial a nuestro tutor Ing. Lenin Aucatoma, quien ha sido el eje central para el desarrollo de este artículo académico, por su predisposición, tiempo y conocimiento que nos ha brindado a lo largo de este proceso. De igual forma a todos los docentes de la UPS que gracias a su instrucción académica logré un crecimiento tanto personal como profesional, lo cual hicieron posible la consecución de este objetivo.

A mis amigos, por haber coincidido y ser increíbles personas, demostrando su afecto sincero y recíproco, en virtud de apoyarnos, darnos palabras de aliento, intercambiar ideas y conocimientos, y principalmente compartir momentos excepcionales.

A mi compañero de tesis y amigo Edgar Llano, quien siempre tuvo la apertura y gentileza de formar un gran equipo de trabajo a lo largo de este tiempo, por tu esfuerzo y dedicación para lograr obtener de esta manera una meta anhelada.

Finalmente, a la Universidad Politécnica Salesiana por haberme ayudado a edificar mi formación profesional y potenciar mis habilidades y conocimientos.

Leonardo Paul Iza Cuzco

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios, por haberme dado salud, sabiduría y fortaleza para seguir adelante permitiéndome culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres al inmenso esfuerzo realizado por su apoyo moral y económico, brindándome su hombro en las adversidades y celebrando a mi lado mis triunfos que ha sido posible cumplir este sueño.

Un agradecimiento especial al Ing. Lenin Aucatoma, asesor de este artículo, por su confianza, conocimientos y guía nos ayudó en cada paso en el presente trabajo titulación. A cada docente que me guiaron en el transcurso de la carrera y compartieron su sabiduría.

A mis amigos David, Dennis, Evelyn, Juan, Marco, Miguel, Santiago, Sobrino y Víctor, que pasamos largas noches de desvelos dándonos ánimo mutuamente y ayudándonos constantemente, gracias por su amistad sincera, palabras de aliento y compartir grandes recuerdos.

A Leonardo Iza junto a él pudimos sacar adelante este excelente trabajo, te agradezco por ser un gran amigo, por tu constante motivación y al estar en buenos y malos momentos, al apoyarnos ambos logramos culminar por un glorioso propósito.

A la Universidad Politécnica Salesiana por recibirme en sus aulas donde se convirtió como mi segundo hogar, me ha permitido formarme como profesional y conocer grandes seres humanos.

Edgar Roberto Llano Catota

Diseño de un arreglo de antenas log-periódicas para la banda de onda milimétrica

Iza Cuzco Leonardo Paul
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
lizac@est.ups.edu.ec

Llano Catota Edgar Roberto
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
ellanoc@est.ups.edu.ec

Aucatoma Guamán Lenin Wladimir
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
laucatoma@ups.edu.ec

Resumen— El presente artículo detalla el diseño, simulación y comparación entre un arreglo de antenas log-periódicas (LPDA) lineales 2x1, 3x1 y un arreglo matricial 2x2, que operan en la banda de ondas milimétricas (mmW) a una frecuencia de resonancia de 60 GHz. Con la finalidad de mejorar sus características se modela los distintos arreglos, que consisten en antenas idénticas, orientadas de forma simétrica equidistante. Estos modelos se derivan a partir del esquema base que se implanta mediante la ejecución de los principios básicos de la estructura de una antena log-periódica y la experimentación de sus diferentes materiales aislantes y conductores. Los arreglos son simulados a través del software ANSYS HFSS. Por consiguiente, se realizó un análisis comparativo donde se verificó el impacto que presenta uno frente a otro, en el cual se logró determinar que al incrementar el número de antenas de carácter lineal y matricial produce un aumento de la ganancia, por esta razón, se obtiene patrones de radiación sumamente directivos, donde el más destacado en cuanto a sus parámetros de dispersión posee una frecuencia de 60 GHz, coeficiente de reflexión (S11) igual a -23.79 dB, VSWR= 1.12 y un patrón de radiación directivo con ganancia máxima de 10.51 dB.

Palabras Clave— Arreglo de antenas, coeficiente de reflexión, log-periódica, onda milimétrica, patrón de radiación.

Abstract— This article details the design, simulation and comparison between a 2x1, 3x1 linear log-periodic antenna array (LPDA) and a 2x2 matrix array, operating in the millimeter wave (mmW) band at a resonance frequency of 60 GHz. In order to improve its characteristics, the different arrangements are modeled, which consist of identical antennas, oriented in an equidistant symmetric way. These models are derived from the basic scheme that is implemented through the execution of the basic principles of the structure of a log-periodic antenna and the experimentation of its different insulating and conducting materials. The arrays are simulated through ANSYS HFSS software. Consequently, a comparative analysis was carried out where the impact presented by one against the other was verified, in which it was determined that increasing the number of linear and matrix antennas produces an increase in gain, for this reason, obtains highly directive radiation patterns, where the most outstanding in terms of its dispersion parameters has a frequency of 60 GHz, reflection coefficient (S11) equal to -23.79 dB, VSWR= 1.12 and a directive radiation pattern with maximum gain of 10.51 dB.

Keywords— Antenna array, reflection coefficient, log-periodic, millimeter wave, radiation pattern.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la importante conectividad masiva de dispositivos exige un transporte de datos de absoluta velocidad, menor tiempo de latencia y un elevado ancho de banda, así como también el uso de nuevas bandas de frecuencias. Por lo que ha visto la oportunidad de llevar a cabo nuevas generaciones de red como es la tecnología 5G, [1] [2] con el propósito de aprovechar y explotar el ancho de banda del espectro de frecuencias extremadamente altas (EHF) que están en el rango de 30 a 300 [GHz], cuyas longitudes de onda van desde 1 a 10 [mm], banda denominada onda milimétrica (mmW) [3]. En consecuencia, debido al limitado alcance de transmisión de datos que ofrecen estas ondas de radio, supone diseñar antenas muy pequeñas con el fin de potenciar su capacidad y calidad de los servicios de telecomunicaciones, por lo cual, deben ser empleadas proporcionalmente a la longitud de onda, esto conlleva una ventaja, conforme a que pueda implementarse un sin número de arreglos en espacios reducidos [4].

Se han realizado diversas investigaciones acerca de la antena log-periódica que abordan únicamente la banda VHF y UHF, sin embargo, en [5] se expone el análisis de la antena LPDA que responde a la banda EHF, específicamente a una frecuencia de 60 [GHz], en definitiva, se estudia el impacto de los parámetros de dispersión. No obstante, todavía no se han profundizado investigaciones sobre arreglo de antenas log-periódicas que trabajen en la banda de ondas milimétricas. De este modo se propone un arreglo de antenas log-periódicas lineal y matricial que operen a la frecuencia de 60 [GHz], con el objetivo de verificar el impacto que plantea un arreglo comparado con otro basado en sus factores de dispersión.

La antena base se compone de un conjunto de dipolos combinados con una línea de transmisión común, por medio del mecanismo de configuración cruzada [6]. Las mismas se ubican idénticamente, entonces los arreglos lineales estarán dispuestos sobre una línea recta equidistantes, a diferencia del arreglo bidimensional o matricial, dispuesto en un mismo plano, pero en otra distancia y orientación [4].

Las antenas inteligentes o agrupación de antenas se diseñarán sobre dos sustratos como el Duroid 5880 y el Teflón, dado que entregan ligeros efectos de dispersión, toda vez que se involucran con frecuencias muy altas, esto evita desplazamiento en la constante dieléctrica y pérdidas tangenciales [7]. Con estas especificaciones dichas anteriormente, se busca ganar directividad de la que se alcanzaría con una sola, así mismo potenciar la ganancia y perfeccionar el patrón de radiación.

II. DISEÑO DE LA ANTENA

En la figura 1 se ilustra la antena log-periódica propuesta para la implementación de los arreglos lineales y el arreglo matricial cuadrado. Está soportada por sustrato (dieléctrico) y dos conductores (dipolos) impresos al lado superior e inferior de la antena, las cuales son dimensionadas en largo, ancho, distancia y grosor, justamente el puerto de excitación se coloca junto al dipolo de menor longitud. Usualmente son puestos en contacto por una impedancia característica de $50 [\Omega]$ para garantizar el suministro de energía eficaz entre la antena y sus líneas de transmisión [8] [9].

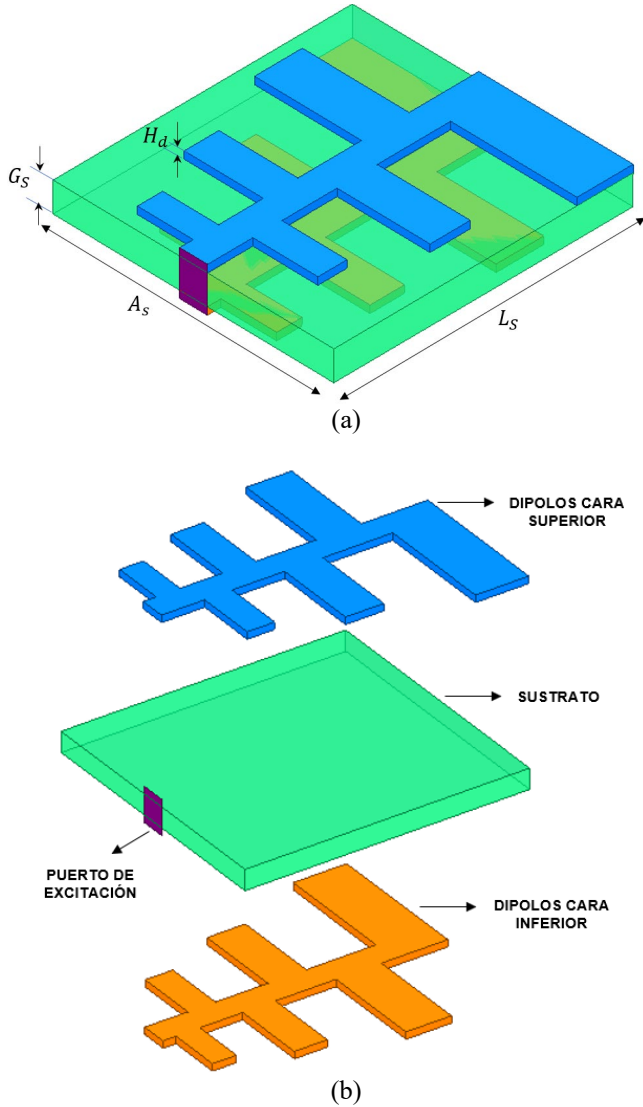


Fig. 1. (a) Modelo de antena log-periódica, (b) Esquema de los componentes y ubicación de los dipolos cara superior e inferior.

Un array de antenas consiste en la agrupación de dos o más antenas que asumen la responsabilidad de fortalecer las propiedades y cualidades de los parámetros de dispersión. La definición geométrica aplicada es lineal y matricial, estos varían en dimensión y posición, desempeñando patrones de radiación máxima, reducción del ancho de haz y suficiente directividad. Generalmente son idénticas y posicionadas a una estimada distancia, en algunos casos previstas en otras direcciones, y finalmente excitadas con una fuente común [10].

Los arreglos lineales son dispuestos a lo largo de una línea recta, distantes uno de otro, a una distancia d que varía en función a la longitud de onda λ , es decir su dimensión dependerá de la frecuencia a la que trabaje la antena [10]. El arreglo bidimensional es especial por su geometría cuadrada 2×2 y se ubica en x e y . Sostienen una arquitectura en paralelo, unidas a base de un adaptador tipo T, que lo convierte en puerto de excitación común, capaz de controlar el haz de propagación paralelamente con el uso de coordenadas esféricas, que promuevan alcanzar absoluta radiación en una determinada dirección [11].

El método de alimentación para cada arreglo es por línea microstrip cuya singularidad es conectarse directamente a la antena acudiendo a la técnica por contacto, seguidamente recae el mismo grosor en los dipolos, así que el mástil cumplirá la función de esta línea. En los arrays la conformación en paralelo resulta ser muy útil, de hecho presta una buena adaptación entre sus líneas de impedancia, concretando así moderada transferencia de potencia [11].

El sustrato a usarse trae una permitividad relativa que permanece entre los valores de 2.1 y 2.2, lo que presta apropiada solidez y es óptimo para el diseño de antenas a imponentes frecuencias, porque restringe las dispersiones y pérdidas tangenciales. Varios fabricantes han elaborado novedosos compuestos aspirando afianzar las propiedades eléctricas y mecánicas, dando origen a sustratos como Rogers RT/Duroid 5880 y Teflón, favorables en antenas inteligentes [12] [13].

Se construirá en base a cálculos matemáticos y la aplicación de fórmulas ya establecidas para este tipo de antena, misma que será utilizada para el desarrollo de los tres tipos de arreglos, y posterior ser sometido al software de simulación ANSYS HFSS.

A. Diseño de la Antena Unitaria Log-Periódica

La estructuración de la antena está en una categoría de frecuencias mínima y máxima que comprenden los valores de (55-65) [GHz] respectivamente. Estas frecuencias son pertinentes para que ofrezca un espléndido nivel de funcionamiento. En el dipolo más pequeño surge la mayor frecuencia de resonancia, a la par que, en el dipolo más grande resuena la frecuencia menor. Las dimensiones de los elementos se describen por un factor de escala (τ) y un factor de espaciamiento (σ), las cuales generan el aspecto geométrico de la antena. El factor de escala $\tau = 0.85$ se determina con (1) [14]:

$$\tau = \frac{f_1}{f_2}, f_2 > f_1 \quad (1)$$

De esta forma, con la gráfica de Carrel. R [15] se adquiere el factor de espaciamiento $\sigma = 0.13$ y la directividad de 7.5 [dB]. En la figura 2 se describen los criterios que constituyen la antena unitaria, para posterior hacer uso de las siguientes fórmulas establecidas en Balanis. C [14] y calcular sus componentes.

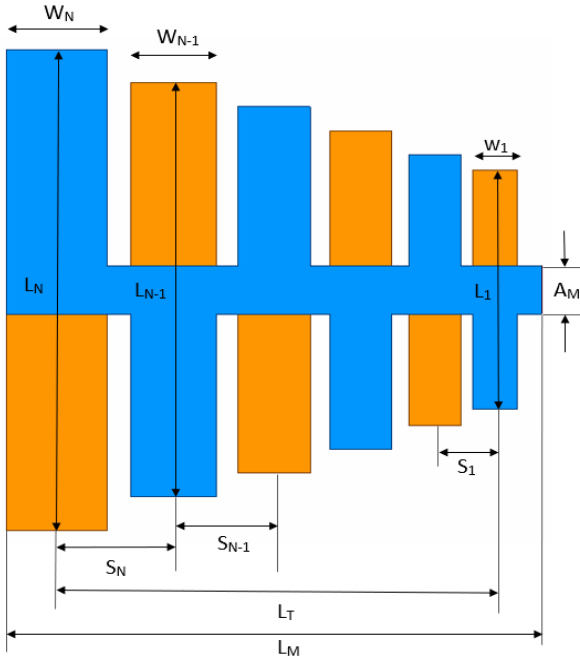


Fig. 2. Parámetros de la antena unitaria log-periódica.

Seguidamente, se procede al cálculo del ángulo de apertura con:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{1-\tau}{4\sigma} \right) \quad (2)$$

La antena matemáticamente tiene un ancho de banda:

$$B_s = B * B_{ar} = B[1.1 + 7.7(1 - \tau)^2 \cot(\alpha)] \quad (3)$$

$$B = \frac{F_{max}}{F_{min}} \quad (4)$$

Donde:

B_s = ancho de banda diseñado

B = ancho de banda deseado

B_{ar} = ancho de banda de la región activa

Longitud entre dipolo más pequeño al dipolo más grande:

$$L_T = \frac{\lambda_{max}}{4} \left(1 - \frac{1}{B_s} \right) \cot(\alpha) \quad (5)$$

La longitud de onda máxima se define como:

$$\lambda_{max} = \frac{c}{F_{min}} \quad (6)$$

La variable c es la velocidad de la luz

$$c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$$

El número total de elementos está comprendido por:

$$N = 1 + \frac{\ln(B_s)}{\ln\left(\frac{1}{\tau}\right)} \quad (7)$$

La longitud del dipolo más largo:

$$l_{max} = \frac{\lambda_{max}}{2} \quad (8)$$

En base a la ecuación (8) se calcula el resto de las longitudes:

$$L_N = (L_{N+1}) * \tau \quad (9)$$

Los dipolos están separados uno de otro:

$$S_{N+1;N} = 2\sigma * L_{N+1} \quad (10)$$

El ancho de los dipolos guarda una novedad particular, puesto que con la aplicabilidad de un software libre llamado Microstrip Line Calculator, se calcula sus dimensiones basándose en el dieléctrico Duroid 5880, con constante eléctrica (ϵ_r) igual a 2.2, pérdida tangencial (δ) de 0.0009, frecuencia de resonancia de 60 [GHz] e impedancia de 50 [Ω], grosor de sustrato (H) valor de 0.2 [mm]. Con la identificación de los datos manifestados, se conforma el ancho del dipolo más grande (W_N) con el cual se podrá ejecutar el resto de los dipolos haciendo uso de (11) [16].

$$W_N = W_{N+1} * \tau \quad (11)$$

En la tabla 1 se muestran las dimensiones de la antena unitaria log-periódica, que pasó por múltiples pruebas y corrección en las dimensiones, todas estas procesadas en el software ANSYS HFSS, misma que servirá para llevar adelante los arreglos lineales 2x1, 3x1, incluido el arreglo matricial cuadrado 2x2.

TABLA 1. Valores y dimensiones de la antena unitaria log-periódica.

Diseño antena unitaria log-periódica			
Nombre	Símbolo	Dimensión [mm]	Material
Largo de dipolos superior / inferior ($\frac{L_N}{2}$)	L6	1.36	Oro
	L5	1.15	
	L4	1.00	
	L3	0.85	
	L2	0.70	
	L1	0.60	
Ancho de dipolos superior / inferior	W6	0.60	
	W5	0.51	
	W4	0.43	
	W3	0.37	
	W2	0.31	
	W1	0.27	
Separación de dipolos superior / inferior	S6	0.70	
	S5	0.60	
	S4	0.52	
	S3	0.44	
	S2	0.36	
	S1	0.70	
Ancho Mástil	A_M	0.30	
Largo Mástil	L_M	3.20	
Grosor de dipolos / mástil	Hd	0.08	
Ancho sustrato	As	3.02	Rogers RT/Duroid 5880
Largo sustrato	Ls	3.20	
Grosor sustrato	Gs	0.32	

B. Arreglo Lineal 2x1

Este arreglo representa la unión de dos antenas log-periódicas simétricas, conectadas en paralelo por varias líneas de transmisión y un adaptador que es el punto común de carga, como se observa en la figura 3, las antenas se distribuyen sobre el eje "y" a una distancia:

$$d = 0.68\lambda \text{ [mm]} \quad (12)$$

Las dimensiones son descritas en la tabla 2, además cabe recalcar que las magnitudes de la antena son especificadas en la tabla 1, por cuanto estas son simétricas y gozan de la misma amplitud de excitación.

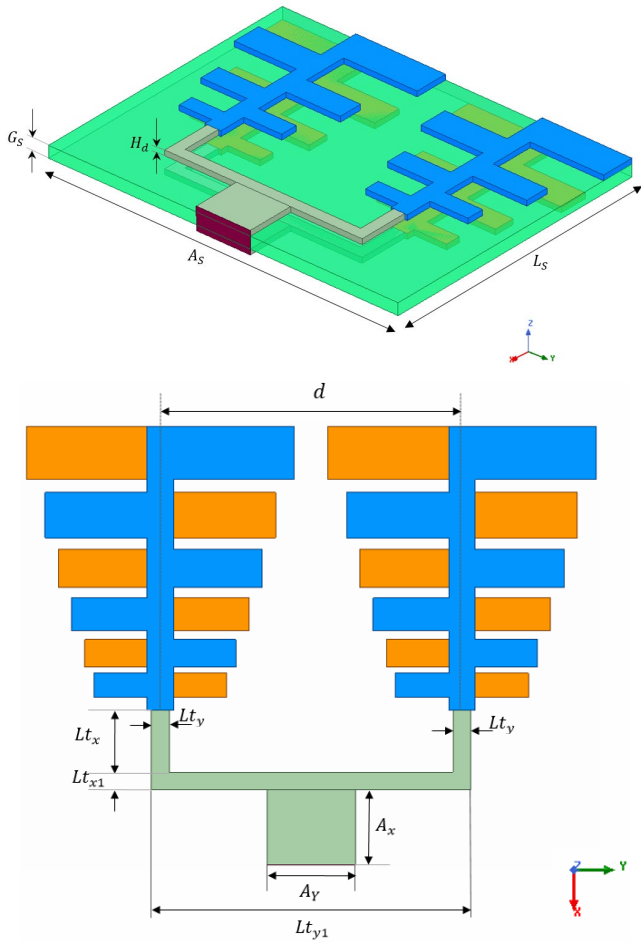


Fig. 3. Dimensiones del arreglo lineal 2x1 con antenas log-periódicas.

TABLA 2. Valores y dimensiones del arreglo lineal 2x1.

Diseño arreglo lineal 2x1			
Nombre	Símbolo	Dimensión [mm]	Material
Grosor de dipolos / mástil	Hd	0.12	Plata
Distancia de separación de las antenas	d	3.4	
Líneas de transmisión	Ltx	0.7	Cobre
	Ltx1	0.2	
	Lty	0.2	
	Lty1	3.6	
Acople	Ax	0.85	Rogers RT/Duroid 5880
	Ay	1.00	
Sustrato	As	6.42	
	Ls	4.95	
	Gs	0.21	

C. Arreglo Lineal 3x1

Este segundo arreglo está compuesto por tres antenas similares agrupadas en paralelo, las mismas que son equidistantes en “y”, determinado por una distancia:

$$d = 0.69\lambda \text{ [mm]} \quad (13)$$

De igual modo se ha desplazado la antena del centro en “x” con distancia $d1$. En la figura 4 se esclarece la distribución del arreglo propuesto. Las dimensiones de su línea de transmisión y materiales se detallan en la tabla 3. Las antenas en el marco de que son simétricas conservan los mismos caracteres, en la tabla 1 se puntualiza cada una de ellas.

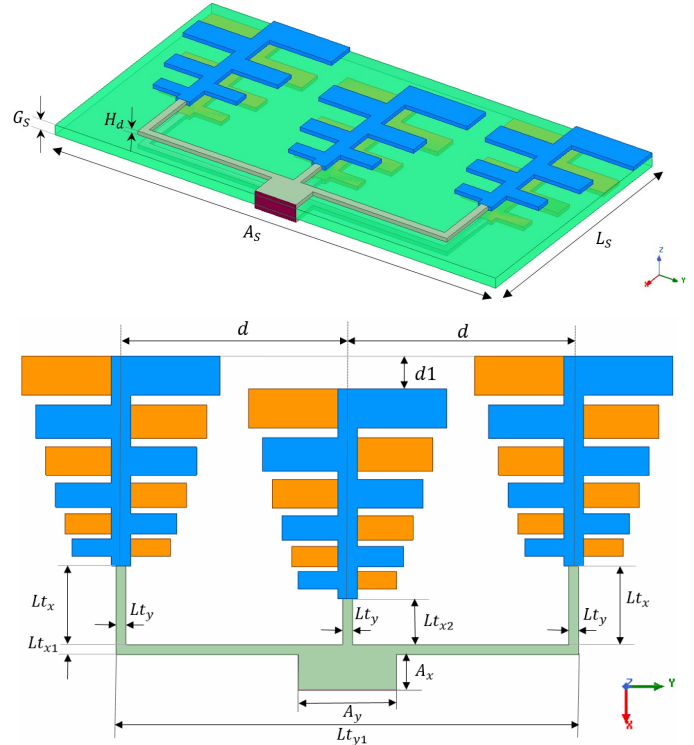


Fig. 4. Dimensiones del arreglo lineal 3x1 con antenas log-periódicas.

TABLA 3. Valores y dimensiones del arreglo lineal 3x1.

Diseño arreglo lineal 3x1			
Nombre	Símbolo	Dimensión [mm]	Material
Grosor de dipolos / mástil	Hd	0.13	Plata
Distancia de separación de las antenas	d	3.45	
	d1	0.5	Oro
Líneas de transmisión	Ltx	1.2	
	Ltx1	0.15	
	Ltx2	0.7	
	Lty	0.15	
	Lty1	7.05	
Acople	Ax	0.55	Teflón(tm)
	Ay	1.5	
Sustrato	As	9.92	
	Ls	5.1	
	Gs	0.2	

D. Arreglo Matricial 2x2

En este arreglo se debe considerar las dimensiones de la antena efectuados previamente, las cuales se interpretan en la tabla 1. Se compone por cuatro antenas iguales contenidas alrededor del eje (x, y). Las distancias de separación se encuentran definidos por:

$$dx = 0.8\lambda \text{ [mm]} \quad (14)$$

$$dy = 0.88\lambda \text{ [mm]} \quad (15)$$

Como se aprecia en la figura 5 las antenas son asociadas en paralelo con la línea de transmisión que incluye una composición tipo T, las dimensiones que traen consigo la línea de conducción y materiales se visualizan en la tabla 4.

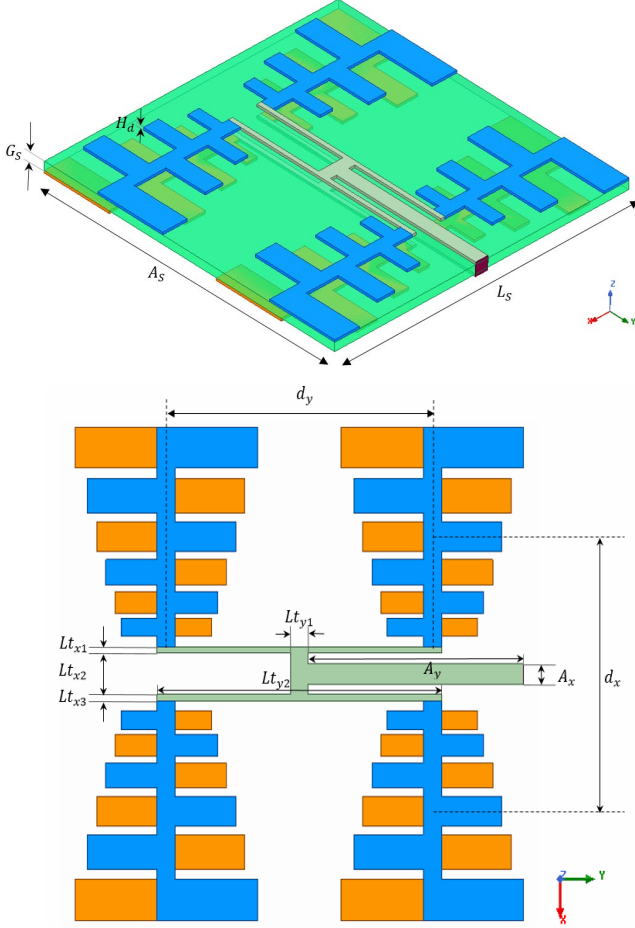


Fig. 5. Dimensiones del arreglo matricial 2x2 con antenas log-periódicas.

TABLA 4. Valores y dimensiones del arreglo matricial 2x2.

Diseño arreglo matricial cuadrado 2x2			
Nombre	Símbolo	Dimensión [mm]	Material
Grosor de dipolos / mástil	Hd	0.055	Plata
Distancia de separación de las antenas	dx	4	
	dy	4.4	Cobre
Líneas de transmisión	Ltx1	0.1	
	Ltx2	0.6	
	Ltx3	0.1	
	Lty1	0.3	
	Lty2	4.7	
Acople	Ax	0.3	Rogers RT/Duroid 5880
	Ay	3.56	
Sustrato	As	7.42	
	Ls	7.2	
	Gs	0.21	

III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para analizar el comportamiento e identificar las propiedades que presentan los arreglos, se recurrió a los parámetros como el coeficiente de reflexión S_{11} , ROE o VSWR, diagrama de radiación, ángulo de apertura, ganancia y ancho de banda.

A. Coeficiente de Reflexión S_{11}

El coeficiente de reflexión S_{11} es muy determinante, pues hace énfasis a la cantidad de energía que se refleja y la potencia que se transmite, idealmente se obtuvo pérdidas que abarcan un dominio de -21.68 [dB] a -23.79 [dB] como cifras aceptables, tomando como referencia el valor ideal de -20 [dB], pues en este valor hay escaso nivel de pérdidas por reflexión. En realidad cuenta con adaptación eficiente lo que podría decirse que la antena es apta para transmitir a la frecuencia de resonancia de 60 [GHz].

En la figura 6 se observan los resultados de simulación obtenidos, y se aprecia que los arreglos lineales y la antena unitaria centran una frecuencia equivalente a 60 [GHz], con pérdidas variables.

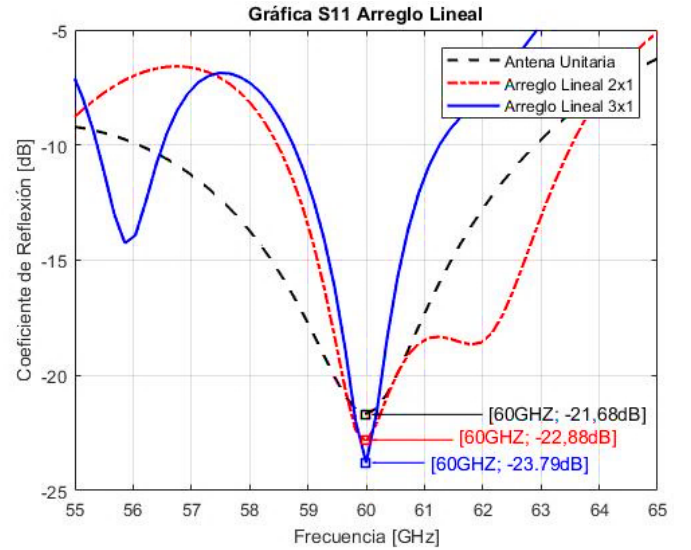


Fig. 6. Coeficiente de reflexión S_{11} [dB] de la antena unitaria y arreglos lineales 2x1, 3x1.

En la tabla 5, se registra las pérdidas de la antena unitaria como de los arreglos lineales, a la frecuencia de 60 [GHz], se comprueba un cambio de 1.2 [dB] entre la antena unitaria y el arreglo 2x1. Para la antena unitaria y el arreglo 3x1 ocurre una alteración de 2.11 [dB], igualmente la variabilidad entre el arreglo 2x1 y 3x1 es de 0.91 [dB].

Corroborando la comparación de los resultados obtenidos entre la antena unitaria y los arreglos lineales 2x1 y 3x1, se certifica que no contempla un realce del coeficiente de reflexión, de acuerdo a los recursos de los arreglos, al tratarse de la distancia y colocación en el plano, más aún al extender la dimensión del grosor de los dipolos, el valor de S_{11} va aumentando sucesivamente, provocando una corta dispersión, pero esto no significa que se alejan del valor ideal de -20 [dB], en efecto se cumple con la relación 1/100 lo que permite asegurar pérdidas por reflexión muy bajas.

TABLA 5. Resultados del coeficiente de reflexión S_{11} de los arreglos lineales 2x1 y 3x1 con la antenna unitaria a la frecuencia de 60 [GHz].

Diseño	S_{11} [dB]
Antena Unitaria	-21.68
Arreglo Lineal 2x1	-22.88
Arreglo Lineal 3x1	-23.79

En la figura 7 se expresan los resultados de la antenna unitaria y el arreglo matricial 2x2, los cuales administran una frecuencia de 60 [GHz], que da lugar a un repunte en el valor del S_{11} en alusión a la antenna unitaria, pero aún sigue siendo un valor aceptable, asumiendo que el nivel de pérdidas por reflexión es despreciable y no interfiere la correcta funcionalidad.

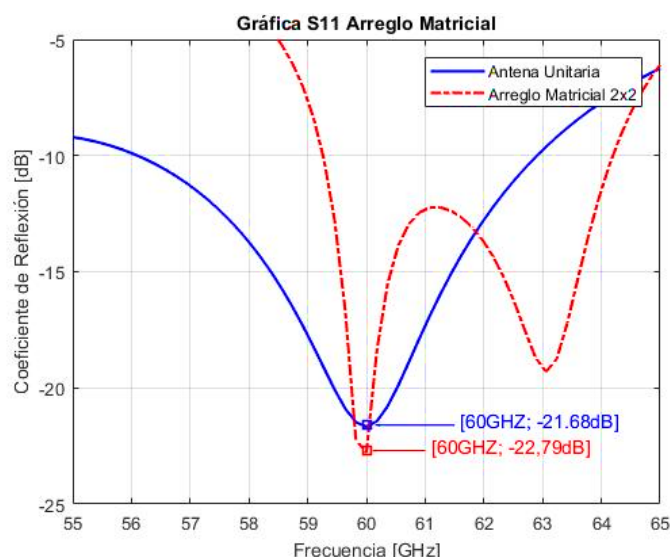


Fig. 7. Coeficiente de reflexión S_{11} [dB] de la antenna unitaria y arreglo matricial 2x2.

En la tabla 6, se revela las pérdidas de la antenna unitaria, al igual que del arreglo matricial 2x2, se nota una elevación de 1.11 [dB], esto se debe a la incorporación geométrica de las antenas dentro del plano y por el adaptador tipo T.

TABLA 6. Resultados del coeficiente de reflexión S_{11} del arreglo matricial 2x2 con la antenna unitaria a la frecuencia de 60 [GHz].

Diseño	S_{11} [dB]
Antena Unitaria	-21.68
Arreglo Matricial 2x2	-22.79

B. Relación de Onda Estacionaria de Voltaje (ROE) o VSWR

El VSWR indica el vínculo entre la tensión máxima y mínima de la antenna durante su línea de transmisión, esto es que la señal reflejada se adhiere a la señal de alimentación dando origen a la onda estacionaria. A causa de esto se origina un criterio muy aplicado para el modelamiento de las antenas a altas frecuencias, el cual marca que debe cumplir con la razón de $1 \leq \text{VSWR} \leq 1.5$, consolidándose de esta manera como un acoplamiento óptimo de sus impedancias, de manera semejante esta curva ayuda a encontrar el ancho de banda (BW) de los múltiples arreglos [17] [18].

La figura 8 informa los resultados obtenidos del valor VSWR de la antenna unitaria como de los arreglos lineales a la frecuencia de 60 [GHz], encontrándose valores en un orden de 1.12 a 1.44 que podrían fijarse como ideales para su operatividad.

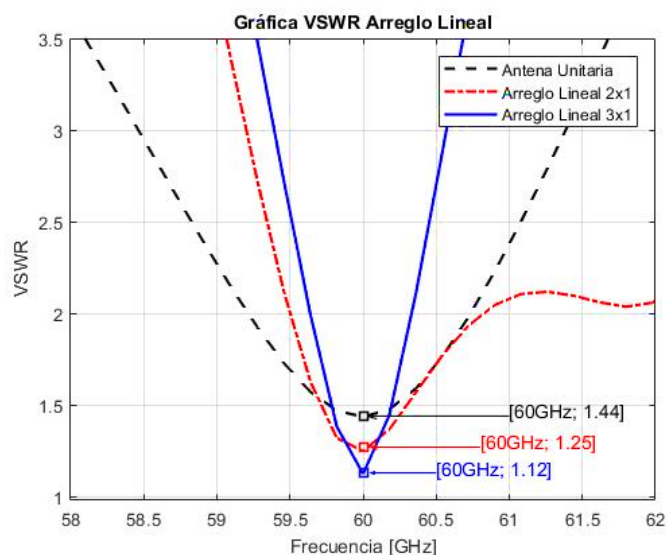


Fig. 8. VSWR de la antenna unitaria y arreglos lineales 2x1, 3x1.

En la tabla 7 se distingue los resultados obtenidos del VSWR y la variedad que conceden todos ellos, el arreglo lineal 2x1 optimiza la adaptación de impedancia en 0.19 en torno a la antenna unitaria, entre tanto el arreglo lineal 3x1 adopta un crecimiento de 0.32 correspondiente al tratado con antelación, es por esto que implica un acoplamiento casi perfecto, aproximándose al valor ideal de $\text{VSWR} = 1$, los mismos que están dentro de los criterios aceptables, y esto favorece para un manejo acertado en la frecuencia de operación.

El ancho de banda se concreta por intermedio de la frecuencia superior e inferior, ajustado en la curva del VSWR o ROE, como inicio se toma desde el punto crítico mínimo de la curva hacia arriba con un valor de 1.5, como consencuencia al ir extendiendo el número de arreglos va decreciendo su valor de ancho de banda (BW), por tal razón se minimiza en 0.76% partiendo desde la antenna unitaria hasta el arreglo lineal 3x1, de ahí que el ancho de banda es limitado, como se señala en la tabla 7.

TABLA 7. Resultados de relación de onda estacionaria (ROE) o VSWR y Ancho de Banda (BW) de los arreglos lineales con la antenna unitaria a la frecuencia de 60 [GHz].

Diseño	VSWR	Frecuencia Superior [GHz]	Frecuencia Inferior [GHz]	BW [MHz]	BW [%]
Antena Unitaria	1.44	60.35	59.50	850	1.42
Arreglo Lineal 2x1	1.25	60.30	59.71	590	0.98
Arreglo Lineal 3x1	1.12	60.19	59.79	400	0.66

En la figura 9 se visualiza los valores de VSWR de la antenna unitaria y el arreglo matricial que resuenan a la frecuencia de 60 [GHz]. Así que se logra revelar un buen acoplamiento para el matricial.

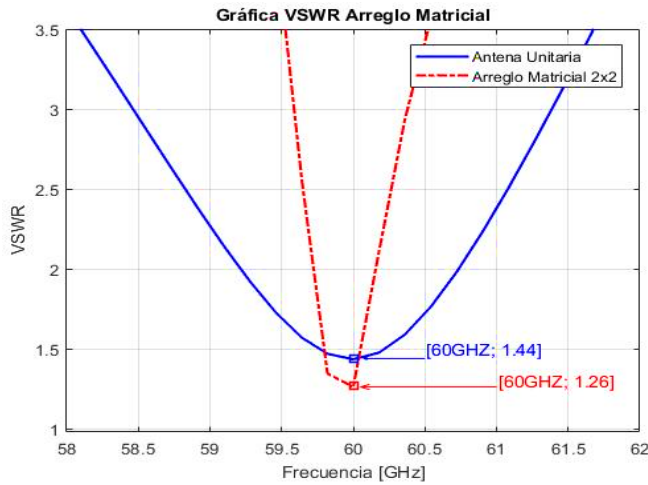


Fig. 9. VSWR de la antenna unitaria y arreglo matricial 2x2.

En la tabla 8 se evalúa la actuación de este, y se constata que el arreglo matricial evoluciona considerablemente su valor de VSWR, este se afina en 0.18, lo que posibilita acercarse al valor ideal de 1.

El ancho de banda se tomará como base desde el punto crítico mínimo de la curva del VSWR hacia arriba en 1.5, obteniendo una disminución del 1% del ancho de banda en contraste con la antenna unitaria, estas fluctuaciones figuran en la tabla 8.

TABLA 8. Resultados de relación de onda estacionaria (ROE) o VSWR y Ancho de Banda (BW) del arreglo matricial 2x2 con la antenna unitaria a la frecuencia de 60 [GHz].

Diseño	VSWR	Frecuencia Superior [GHz]	Frecuencia Inferior [GHz]	BW [MHz]	BW [%]
Antena Unitaria	1.44	60.35	59.50	850	1.42
Arreglo Matricial 2x2	1.26	60.05	59.80	250	0.42

C. Diagrama de Radiación

El patrón de radiación se define como la representación gráfica del campo de radiación de la antenna que funciona bajo un sistema de coordenadas espaciales, por lo común se describe en la región a campo lejano [13].

Para describir el diagrama de radiación se opta por los planos del campo eléctrico (E) y campo magnético (H), los mismos que son de gran importancia para el estudio de radiación de las antenas, para lo cual se mide sus ángulos de apertura en vertical y horizontal, básicamente representados en un plano dimensional. En general el diagrama de radiación es direccional para la antenna unitaria log-periódica como para los arreglos lineales, no así con el arreglo matricial en vista que este es un diagrama bidireccional [19].

Se debe agregar que, los lóbulos laterales o secundarios reciben insuficiente amplitud que el principal, estos ocasionan interferencia al momento de la comunicación, por tal motivo, se decidió en maximizar su lóbulo principal y minimizar sus lóbulos laterales. Este aspecto permite identificar la diferencia de ganancia y directividad de un arreglo sobre otro.

El campo magnético (H) en este caso sitúa al lóbulo principal, sus lóbulos laterales, lóbulos posteriores, y su ángulo de apertura de los arreglos. Por otro lado, el campo eléctrico (E) no permite identificar claramente sus elementos del diagrama de radiación. Los ángulos de recepción se lo expresan en horizontal y vertical denominándose así, ancho de haz horizontal y vertical respectivamente.

En la figura 10 se visibiliza los resultados obtenidos de los diagramas de radiación del campo E con corte de $\phi = 0^\circ$ y del campo H con corte de $\phi = 90^\circ$, tanto de la antenna unitaria como de los arreglos lineales 2x1 y 3x1. Cabe mencionar que el ancho de haz vertical dota de la misma ganancia que el horizontal, recordando que solamente son cortados en varios ángulos, con ello el desfase del ángulo de apertura descende uno ante otro.

Diagrama de Radiación Campo [E]

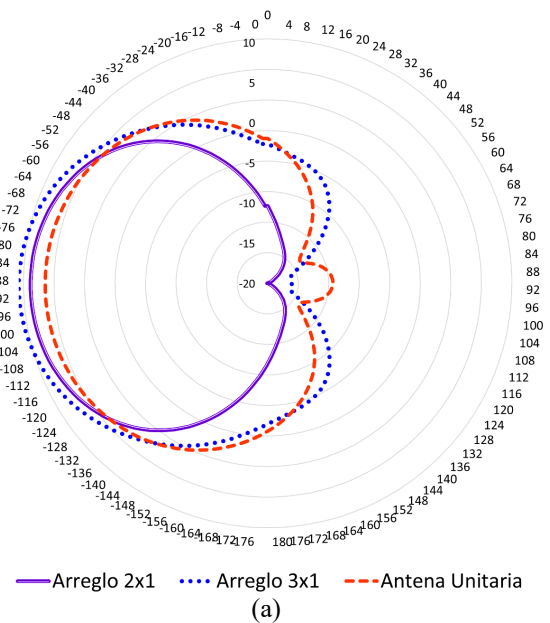


Diagrama de Radiación Campo [H]

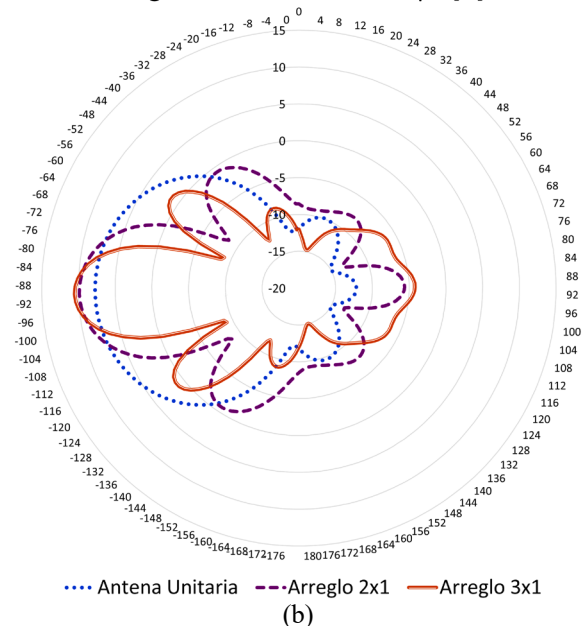


Fig. 10. (a) Diagrama de radiación del campo [E] con corte $\phi = 0^\circ$ de la antenna unitaria y arreglos lineales 2x1, 3x1, (b) Diagrama de radiación del campo [H] con corte $\phi = 90^\circ$ de la antenna unitaria y arreglos lineales 2x1, 3x1.

El ancho de haz sirve para conocer qué tan directivas son las antenas, este ángulo concretamente nace de la unión de dos líneas imaginarias trazadas en el eje bisectriz del lóbulo principal a -3 [dB] de la ganancia máxima, dicho de otra manera, la señal de captación se halla entre 70% y el 100% de su potencia. Asimismo, es inversamente proporcional a la ganancia directiva, en la medida que el ángulo disminuye, la ganancia aumentará.

En la tabla 9 se denota el ancho de haz de los arreglos lineales como de la antena unitaria descritos en el campo H, se prueba que, al añadir antenas simétricas lineales, estas anuncian una creciente directividad, ya que el ancho de haz de la antena unitaria frente al arreglo 2x1 se estrecha en 33°, en cambio el arreglo 3x1 se limita en 10° en relación con el 2x1, esto quiere decir el arreglo que tenga numerosa cantidad de antenas, recibe cuantiosa directividad. A propósito, se evidencia que la ganancia de los arreglos 2x1 y 3x1 crecen los valores y estos oscilan entre los 2 y 3 [dB] respectivamente. Adicional, el campo E efectúa una variación alrededor de 12° entre el primer y último modelo.

TABLA 9. Resultados de los parámetros del diagrama de radiación de los arreglos lineales con la antena unitaria a la frecuencia de 60 [GHz].

Diseño	Ancho de Haz		Ganancia [dB]
	Vertical [E]	Horizontal [H]	
Antena Unitaria	108°	65°	7.7
Arreglo Lineal 2x1	98°	32°	9.88
Arreglo Lineal 3x1	96°	22°	10.51

En la figura 11 se da a conocer los resultados obtenidos de los diagramas de radiación del campo E con corte de $\phi=0^\circ$ y del campo H con corte de $\phi=90^\circ$ pertenecientes a la antena unitaria como al arreglo matricial 2x2, por lo tanto, al hablar del campo H este se compone de dos lóbulos principales y lóbulos laterales. Según la distinción de estos se revisa que el arreglo matricial al tener dos lóbulos irradia en dos direcciones opuestas, en comparación con la antena unitaria que lo hace en una sola, desde luego por la condición de las antenas asignadas en el plano. El nivel de irradiación que desprenden los lóbulos es individual para cada sentido. Por añadir, el campo E aporta solamente dos lóbulos principales.

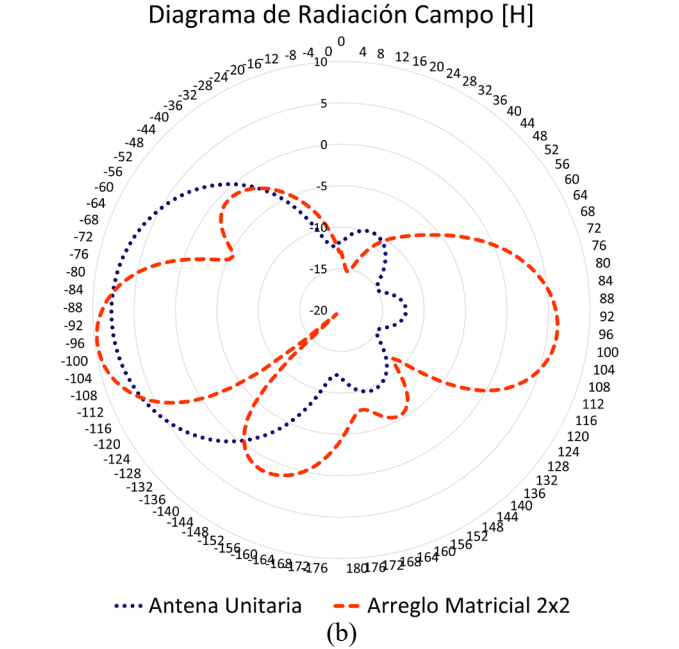
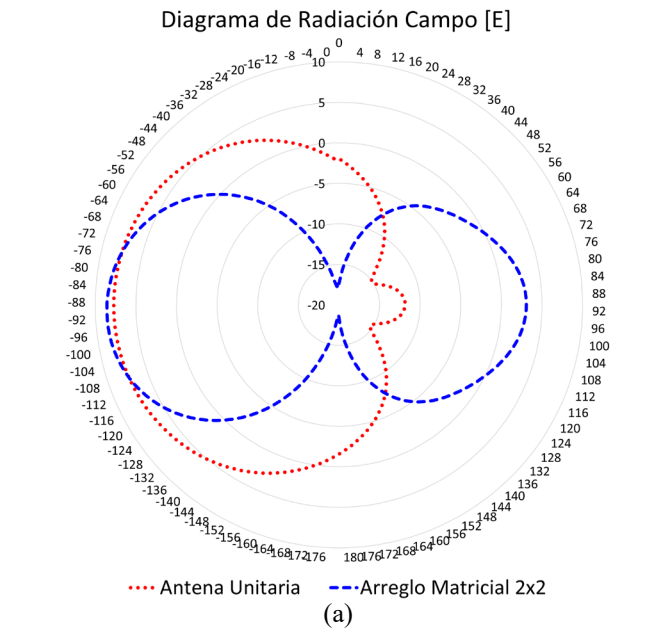


Fig. 11. (a) Diagrama de radiación del campo [E] con corte $\phi=0^\circ$ de la antena unitaria y arreglo matricial 2x2, (b) Diagrama de radiación del campo [H] con corte $\phi=90^\circ$ del diseño de la antena unitaria y arreglo matricial 2x2.

Para el ancho de haz cabe recalcar, se toma su medición a la mitad de la potencia a -3 [dB] de la ganancia máxima concerniente a cada lóbulo principal. El ancho del haz del campo H se muestra en la tabla 10, en la cual proyecta una modificación entre el primer lóbulo del arreglo matricial y la antena unitaria, evidentemente hay una disminución de 35° del ángulo de apertura, por su parte el segundo lóbulo su ancho se expande 8° en relación con el antecesor. Asimismo, en el campo E el ángulo se reduce entre 40° y 36°.

Acerca de la ganancia, la tabla 10 admite un ascenso de 2 [dB] partiendo desde el lóbulo principal de la antena unitaria hasta el primero del arreglo matricial, adicionalmente en el segundo lóbulo existe una disminución de 3.12 [dB] respecto al lóbulo del otro extremo.

TABLA 10. Resultados de los parámetros del diagrama de radiación del arreglo matricial 2x2 con la antena unitaria a la frecuencia de 60 [GHz]

Diseño	Ancho de Haz				Ganancia [dB]	
	Vertical [E]		Horizontal [H]			
Antena Unitaria	108°		65°		7.7	
Arreglo Matricial 2x2	68°	72°	30°	38°	9.7	6.58

En la figura 12 se exhibe los diagramas de radiación tridimensional de la antena unitaria, tal como los arreglos lineales y el arreglo matricial, a la frecuencia de 60 [GHz]. La ganancia asciende progresivamente, dependiendo del número de arreglos se va obteniendo notable concentración de potencia en el lóbulo principal, en este sentido se convierte en un patrón de radiación cada vez más directivo, reduciendo el ángulo de apertura de manera gradual, lo que genera la aparición de lóbulos laterales y posteriores. Cabe señalar que la antena unitaria y los arreglos lineales reflejan un patrón unidireccional, en su lugar, el matricial responde a un patrón bidireccional.

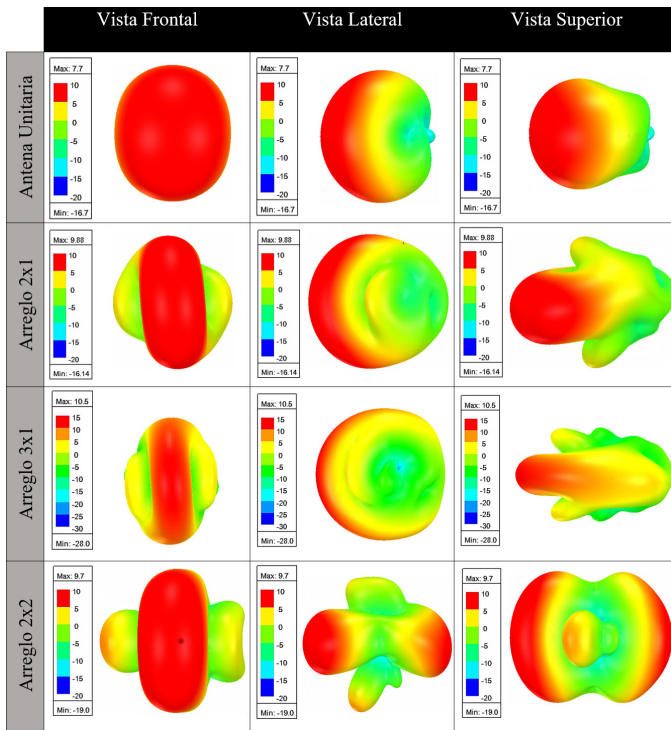


Fig. 12. Diagramas de radiación en 3D con vista frontal, lateral y superior de los variados diseños para una frecuencia de resonancia $f=60$ [GHz].

D. Comparación de Coeficiente de Reflexión S_{11} , Ancho de Banda y Relación de Onda Estacionaria (ROE) o VSWR entre los Arreglos Lineales y el Arreglo Matricial

En la tabla 11 se explica la comparación de las pérdidas por retorno de los distinguidos arreglos, todos reaccionando a la frecuencia de 60 [GHz], estos resultados aclaran que todos continúan dentro del criterio aceptable de -20 [dB] para S_{11} , siendo la antena unitaria log-periódica la que mejor coeficiente de reflexión percibe. La relación $\frac{P_R}{P_T}$ demuestra que la potencia reflejada está por debajo del 0.67%, resultando ser muy insignificante el nivel de pérdidas. Se debe agregar que el S_{11} está actuando inversamente proporcional al VSWR. Al elevar uniformemente el grosor de los dipolos se empieza generar distorsión en los valores del S_{11} entre uno y otro, pues se van alejando del valor ideal, de todas maneras estas pérdidas resultan ser discretas lo que no afectaría en absoluto el rendimiento de la antena.

Por otro lado, el VSWR del arreglo lineal 3x1 sobresale ante los demás, intensificando su adaptación de impedancia entre sus líneas de transmisión con la fuente de excitación y por ende, optimizar las pérdidas en 0.32. Está articulado por tres antenas log-periódicas equivalentes, todas separadas a una misma escala del eje "y", mientras tanto el eje "x" por causa de su complejo acoplamiento se desplazó la antena central en 0.5 [mm], así mismo se añade tres líneas que conectan a la salida de los dipolos con más baja longitud. La línea de transmisión del centro es exclusiva al de los extremos, así mismo se utilizó un acople de impedancias y la variación de las dimensiones del grosor de los dipolos y del sustrato.

En consecuencia con lo anterior, se ajustó múltiples veces el dieléctrico, por lo visto que el teflón se adhiere plenamente a los dipolos, reduciendo el nivel de pérdidas y consiguiendo refinar la adaptación entre sus líneas de impedancia, por lo que es ideal

para reaccionar a intensas frecuencias. La permeabilidad del Teflón es relativamente baja al igual que el Duroid, ambos materiales se diferencian en tan solo 0.1 de su constante dieléctrica y se ajustan perfectamente para evitar desfases de corriente que impidan su correcto desempeño, teniendo en cuenta la necesidad de contrarrestar los efectos de desacople para mantener un óptimo porcentaje de potencia radiada.

TABLA 11. Análisis comparativo del coeficiente de reflexión S_{11} y relación de onda estacionaria (ROE) o VSWR de la antena unitaria, arreglos lineales y el arreglo matricial 2x2.

Parámetros de dispersión					
Diseño	Frecuencia [GHz]	S_{11} [dB]	VSWR	Dieléctrico	Constante dieléctrica
Antena Unitaria	60.00	-21.68	1.44	Duroid	2.2
Arreglo 2x1	60.00	-22.88	1.25	Duroid	2.2
Arreglo 3x1	60.00	-23.79	1.12	Teflón	2.1
Arreglo matricial 2x2	60.00	-22.79	1.26	Duroid	2.2

En la tabla 12 se detecta que el ancho de banda (BW) de los arreglos va disminuyendo en sentido decreciente, a poco más de la mitad de su valor, por tanto, al añadir el número de antenas, el ancho de banda se va acortando cada vez más, en cualquier caso esto no afecta sus niveles de reactancia.

TABLA 12. Análisis comparativo del ancho de banda de la antena unitaria, arreglos lineales y arreglo matricial 2x2.

Ancho de Banda (BW)		
Diseño	BW [MHz]	BW [%]
Antena Unitaria	850	1.42
Arreglo 2x1	590	0.98
Arreglo 3x1	400	0.66
Arreglo matricial 2x2	250	0.42

E. Comparación de los parámetros del diagrama de radiación entre los Arreglos Lineales y el Arreglo Matricial

La tabla 13 demuestra que el arreglo lineal 3x1 es más directivo que todos, una vez que su ángulo de apertura se reduce en 43° a proporción de la antena unitaria. El lóbulo principal dispone de una concentrada radiación de potencia en una cierta trayectoria, efectivamente gracias a la distancia de división entre las antenas, cada vez que se alejan una de otra, es así que el ancho del lóbulo se empieza a expandir, por lo contrario, siempre que se acercan este empieza a reducir su ángulo. El segundo con mejor directividad es el arreglo matricial 2x2, sus ángulos se disipan en casi a la mitad de la antena unitaria. Se integra por cuatro antenas similares fijadas en alternas posiciones pero espaciadas equitativamente en "x", lo mismo que en el eje "y", todas interpuestas en paralelo con un adaptador tipo T, cuya finalidad es de autenticar concentración de potencia máxima. El intervalo longitudinal para conseguir más directividad se precisa entre 0.8λ y 0.88λ [mm] de cada uno de sus ejes.

TABLA 13. Análisis comparativo del ancho de haz de la antena unitaria, arreglos lineales y arreglo matricial 2x2.

Ancho de Haz Horizontal [H]	
Antena Unitaria	65°
Arreglo 2x1	32°
Arreglo 3x1	22°
Arreglo matricial 2x2	30° 38°

En la tabla 14 se establece la comparación de las medidas que influyen en la interpretación de los patrones de radiación de la antena unitaria, del mismo modo que de los arreglos lineales y del arreglo matricial. Al momento de la experimentación se comprobó que la ganancia está estrictamente relacionada con el material conductor (dipolos, líneas de transmisión, acople), de ahí que, la conductividad del material se convierte en un factor fundamental para que la antena genere deseada radiación en un sentido específico. Se resalta que la plata se alinea en los dipolos gracias a su magnífica conductividad, al mismo tiempo las líneas y acople rinden excelente con el oro, a raíz de sus diminutas dimensiones (largo y ancho), lo que otorga una ganancia eficaz. Por otra parte, como se examina en las tablas 1, 2 y 3 el grosor de los dipolos y líneas de transmisión va creciendo tan pronto como la intensidad máxima de radiación en todos los arreglos.

Se define que el arreglo lineal 3x1 destaca su ganancia ante los demás, en virtud de que ocupa el mayor número de antenas lineales. Ahora bien, el arreglo matricial a pesar de contar con cuatro antenas no recepta destinada ganancia que el mencionado antes, ciertamente por la disposición en los ejes, inclusive la conexión entre las líneas y acople con las antenas pueden propiciar cierto margen de desvanecimiento, pero no afectaría en la gestión funcional.

TABLA 14. Análisis comparativo de los parámetros del diagrama de radiación de la antena unitaria, arreglos lineales y arreglo matricial 2x2.

Parámetros del diagrama de radiación						
Antena						
Unitaria	Material conductor de dipolos		Conductividad [Siemens /m]		Ganancia [dB]	
	Oro		41 * 10 ⁶		7.7	
	Arreglo					
2x1	Material conductor de dipolos	Conductividad [Siemens /m]	Material conductor de líneas Tx y Acople	Conductividad [Siemens /m]	Ganancia [dB]	
	Plata	61 * 10 ⁶	Cobre	58 * 10 ⁶	9.88	
	Plata	61 * 10 ⁶	Oro	41 * 10 ⁶	10.51	
	Plata	61 * 10 ⁶	Cobre	58 * 10 ⁶	9.7	6.5

IV. CONCLUSIONES

En la consecución de todos los diseños se optimizó que los arreglos trabajen a la frecuencia deseada de 60 [GHz], todas posicionadas sobre un dieléctrico en vista de que trabajan en la banda de ondas milimétricas y esto requiere indudablemente de un sustrato porque los conductores (dipolos) podrían llegar a chocarse entre sí y originar cortocircuito. Los arreglos lineales 2x1 y 3x1 cuentan con restrictiva distancia de separación, esto con la intencionalidad de reducir los nulos existentes. En lo que concierne al arreglo matricial 2x2, el distanciamiento tuvo que aumentar con la intención de disminuir los lóbulos laterales y preservar una satisfactoria realización de este.

Las líneas de transmisión adicionales puestas en práctica interconectan las antenas en paralelo para poder crear el arreglo, y a su vez conectarlas con un adaptador de impedancia común, esta integración desencadena pérdidas por reflexión, pero brinda un acople perfeccionado. Así mismo el grosor de los dipolos influye completamente en el parámetro S_{11} , cuando se agranda su espesor, aumenta el nivel de pérdidas por reflexión.

En observancia al diagrama de radiación es relevante precisar que el ancho de haz se relaciona con la directividad de la antena, para evaluar y tener una total perspectiva acerca de los distintos arreglos se utilizó el campo H, con la labor de descubrir de manera correcta los lóbulos que la componen y delimitar su respectiva ganancia y directividad.

V. REFERENCIAS

- [1] M. Sierra Castañer y C. Fernández Aller, «Análisis del Impacto del 5G en la Sociedad,» Fundación Alternativas, Madrid, 2020.
- [2] R. Perea Tamayo, «5G: A New Generation for a New Society,» Dirección de Instrumentación Científica de la Agencia Espacial del Perú, Lima, 2014.
- [3] J. M. Nieto Escribano, «Diseño de un array de antenas parche con alimentación en serie a 60GHz,» Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 2018.
- [4] B. A. Barrios Hernández, «Desarrollo de un arreglo de antenas en la banda de 38 GHz para la 5G,» Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, 2016.
- [5] C. Paucar y A. Taco, «Análisis de parámetros de dispersión de una antena logarítmica periódica para banda de onda milimétrica,» Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2021.
- [6] F. Fernández Carcasés, D. Rodas Sansón, D. Rodríguez Ávila y F. Marante Rizo, «Diseño de una antena Logarítmica Periódica Impresa en la banda de 470-890 MHz,» Ingeniería Electrónica y Sistemas Industriales, La Habana, 2015.
- [7] E. Medina Beltrán, «Desarrollo de antenas miniatura UWB con aplicación en sistemas de comunicaciones móviles 5G,» Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 2019.
- [8] M. Almalkawi, L. Cross y K. Alshamaileh, «A Transmission Line Circuit-Oriented Approach for Miniaturization of a Log-Periodic Dipole Array (LPDA) Antenna,» IEEE, Kentucky USA, 2014.
- [9] L. Armijos, «Diseño virtual de un arreglo de antenas para sistemas de radio cognitiva basado en el estándar IEEE 802.22 WRAN,» Universidad Nacional de Loja, Loja, 2016.
- [10] P. A. García, «Aplicación de algoritmos de optimización convexa a la síntesis de diagramas de radiación de arrays de antenas,» Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2015.
- [11] J. M. Manzano, «Análisis y diseño de un array de antenas en tecnología microstrip,» Universidad de Alicante, San Vicente del Raspeig, 2020.
- [12] I. Peñañiel, «Diseño e implementación de una antena logarítmica ultra wide band de 1 a 10 ghz para la caracterización de antenas,» Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2019.
- [13] K. O. Nuñez, «Diseño, modelado y caracterización de arreglo de antenas microstrip para aplicaciones del internet de las cosas,» INAOE, Santa María Tonantzintla, Puebla, 2019.
- [14] C. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2016.
- [15] R. Carrel, «The Design of Log-Periodic Dipole,» 1958 IRE International Convention Record, New York, 1966.
- [16] Electromagnetics, and microwave engineering, «Microstrip Line Calculator,» 03 Agosto 2007. [En línea]. Available: <https://emtalk.com/mscalc.php>.
- [17] J. Sáenz, «Definición, diseño y simulación de antena fractal monopolo de sierpinski,» Universidad Ricardo Palma, Lima, 2009.
- [18] R. Alvarez y A. Nobrega, «Desarrollo de un arreglo de antenas patch en la banda 300-650 [MHz],» Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, 2013.
- [19] A. Lozano, «Sistemas de propagación y diseño de antenas enfocado al análisis de enlaces de comunicación,» UANL Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, 2002.
- [20] A. Zhinín y R. Zúñiga, «Estudio sobre las prestaciones de antenas inteligente en sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación (UMTS),» Universidad del Azuay, Cuenca, 2010.